



Серыя «У дапамогу педагогу»
заснавана ў 1995 годзе

Заснавальнік і выдавец — рэспубліканскае
ўнітарнае прадпрыемства
«Выдавецтва «Адукацыя і выхаванне»»
Міністэрства адукацыі Рэспублікі Беларусь

Вул. Будзённага, 21, 220070, г. Мінск;
тэл.: 297-93-24 (адк. сакратар),
297-93-22 (аддзел маркетынгу),
факс: 297-91-49,
<http://www.aiv.by>,
e-mail: fizika@aiv.by

Навукова-метадычны часопіс
Выдаецца з IV квартала 1995 года
Да 2013 года выходзіў пад назвай
«Фізіка: праблемы выкладання»
Пасведчанне аб дзяржаўнай рэгістрацыі
сродку масавай інфармацыі № 687 ад 16.09.2009,
выдадзенае Міністэрствам інфармацыі
Рэспублікі Беларусь
Выходзіць 1 раз у 2 месяцы

Фізіка

5 (124)•2018

верасень — кастрычнік

Рэдакцыйная калегія

МІКАЛАЙ ІВАНОВІЧ ЗАПРУДСКІ —

галоўны рэдактар,

кандыдат педагогічных навук, дацэнт

К. А. ПЯТРОЎ —

намеснік галоўнага рэдактара

В. А. КІЛІЧ — адказны сакратар

У. А. ГОЛУБЕЎ

Л. А. ІСАЧАНКАВА, кандыдат

фізіка-матэматычных навук, дацэнт

А. А. ЛУЦЭВІЧ, кандыдат педагогічных навук,

дацэнт

Ю. У. РАЗВІН, кандыдат

фізіка-матэматычных навук, дацэнт

А. І. СЛАБАДЗЯНЮК, кандыдат

фізіка-матэматычных навук, дацэнт

Рэдакцыйная рада

А. П. КЛІШЧАНКА — старшыня,

доктар фізіка-матэматычных навук,

прафесар

А. У. ЛАЎРЫНЕНКА, доктар

фізіка-матэматычных навук, прафесар

Г. У. ПАЛЬЧЫК, доктар

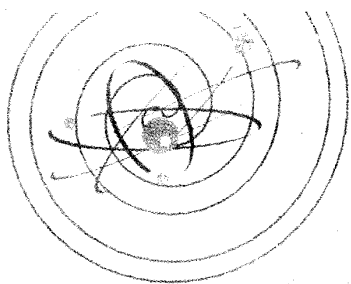
педагогічных навук

І. В. СЕМЧАНКА, доктар

фізіка-матэматычных навук, прафесар

В. В. ШАПЯЛЕВІЧ, доктар

фізіка-матэматычных навук, прафесар



Вырошчваем даследчыкаў

РАЗРАБОТКА И МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ УЧЕБНОЙ МОДЕЛИ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА В РАМКАХ ШКОЛЬНОЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

А. И. Туровец /bear_s@rambler.ru/,
С. М. Барайшук /baraishuksm@gmail.com/

В статье представлена методика организации исследовательской деятельности учащихся в школьной научно-исследовательской лаборатории. Приводятся результаты построения модели атомно-силового микроскопа как одного из самых распространённых и технически понятных приборов для наноманипуляций и изучения свойств поверхности различных материалов. На наш взгляд, материал будет весьма полезным не только как введение в физику наноматериалов, но и для актуализации знаний из различных областей физики. Описана работа «Учебная модель атомно-силового микроскопа», подготовленная в рамках работы данной лаборатории для научно-практической конференции школьников.

Ключевые слова: учебная модель, лабораторное занятие, атомно-силовой микроскоп, школьная лаборатория, нанотехнологии, исследовательская деятельность учащихся.

Введение

Нанотехнологии — это направление науки и технологии, активно развивающееся в последние десятилетия. Они включают создание и использование материалов, устройств и технических систем, функционирование которых определяется наноструктурой, то есть её упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нанометров.

Уже создаются и будут создаваться устройства, функциональные возможности которых определяются необычными свойствами новейших материалов. Благодаря обработке на атомарном уровне привычные материалы будут обладать улучшенными

свойствами, постепенно становясь всё легче, прочнее и меньше по объёму.

Основной итоговой задачей любых современных нанотехнологических исследований является построение технической системы, близкой к идеальной. Её масса, габариты и энергоёмкость стремятся к нулю, в то время как способность выполнять работу при этом не уменьшается. Предельный случай идеализации техники заключается в уменьшении её размеров (вплоть до полного «исчезновения») при одновременном увеличении количества выполняемых ею функций. Закон увеличения степени идеальности гласит: развитие всех

систем ідэі в напраўленні ўзвешчэння ступені ідэальнасці.

На практыцы хорашай ілюстрацыяй гэтага закона можа служыць пастаяннае стремленне прайзводзіцеляў мікразлектронікі поўнасцю перайці к прайзводству нанаістэмнай тэхнікі, характэрыстыкі каторой кардынальным абразам адрэчаюцца ад паказатэляў сістэм і ўстрійстваў аналагічнага назначэння, сздааных па традыцыйным тэхналогіям. В нашасцее врэмя пры прайзводстве працэсараў шырока іспалзуяць 22-нм тэхналогію і перахадзяць к 14-нм тэхпрацэсу прайзводства крystalлаў.

Пэрачысліць все абласці, в каторых гэта глабальная тэхналогія можа сущэствэнна павплываць на тэхнічэскі прагрэс, практычэскі нэвасможна. Можна ўтвэрджаць, чэа фарміруецца нанааука, каторая прэдаставляе сабой сплав разлічных тэхналогій і разлічных нааучных дысцыплін, сходяціхся к абщэй цэлі. Как саабщыл Т. Gyalog, прэзыдэнт Швейцарскага фізічэскага абщэства [1], нанааука как учэбная дысцыпліна ўжэ стала часьцю учэбнай праграмы в ряде універсітэтаў і срднх шкля в Эўропé. Подобныя тэндэнцыі праявляюцца і в США. Напрымер, в Корнэлльскім універсітэцкым цэнтэ нанааразмерных сістэм был сздаан інстытут

прападаватэляў фізікі для павышэння ўрэвня знаянь і панаімання учыцелямі срднэй шкля палэднх разрабэтак в абласці нанафізікі [2].

Внэдрэнне тэм, сьвязаных с пэрспэктывнымі тэхналогіямі, в шклях тэбуеь новых разрабэтак в абласці абразаванія, чэа вазможна в рамках шкляных ісслэдаватэльскіх лабаратарій. Асновная задача, каторая стоіт пэред учыцэлем: адрэдафіць канкрэьныя тэмы (напрымер, апісаніе ўстрійства, ілі спэсэба, ілі характэрыстыкі), каторыя могуь быць ўдэвэлэватэрьна абьяснэны і вклячэны в рамкы сущэствуючэго ўчэбнага плана. Такай прымер можаь пэтрабаваць ад шкляньнікаў рэшэння зааааы іспалзуванія свайх знаянь в новай сітуацыі, нэабходымасці аднавэрэмэнна прымэніць знаянь із разлічных тэм ілі дажэ із разных нааучных дысцыплін.

В нашасцэй рабаь прэдаставлэны рэзуьльтаты пэстраэнія мадэлі атамна-сілавэго мікраскапа как аднаго із самых распрастрааньнх і тэхнічэскі панятных прыбараў для нанамапіуляцый і ізучэння сьвайх сьваьстваў паверхнасці разлічных матэрыалаў. На наш вэгляь, гэта будэь вэсьма пэлезным нэ тоько как ввэдэніе в фізіку нанамаатэрыалаў, но і как аьтуалізацыя знаянь із разлічных абласцяў фізікі.

Сканыруючая зондавая мікраскопія

Нанаразмерныя часьціцы сущэствэвалі в абражаючэй срдэ тысячэлятыямі, напрымер в віде карбона в сажэ. Но прэдамерэнае прайзводствэ нанаразмерных часьціц і ісслэдаваніе іх сьвайх сьваьстваў стало вазможным тоько паслэ таго, как были разрабэтаны спэцыальныя інструмэнты і мэтэды, пэзвалляючыя «вэдэць» гэты часьціцы і мапіуляраваць імі. Адын із такіх мэтэдаў — сканыруючая туннэльная мікраскопія (СТМ) — был разрабэтан Біннігам і Рорэрам в нааалэ 1980-х гадаў. В 1986 гаьу аьтары гэтай разрабэтки были ўдэстаэны Нобэлэвскай прэміі [3; 4]. В СТМ астрая мэталлічэская ігла подвэдыцца к абразцу на расстааніе нэскалькіх аьгстрэм (0.1 нм). Пры подааь на іглу

атнасітэьна абразца нэбольшаго пэнааіала вазнікаеь туннэльны тэа. Вэлічына гэтаго тэаа экспэнаэнціальна заавісйт ад расстаанія абразца — ігла. Нэскалькэ лэа спустя групой Бінніга был разрабэтан атамна-сілавой мікраскоп (АСМ), прынцып дэяьствія катораго аснован на Ван-дэр-Ваальсэвом вэаімадэяьствіі. Інфармааія о тэопаграфіі, шэроховатэсці, трэніі, адгэзіі, ўпругых сьваьствах і т. д. можаь быць пэлучэна с пэмащью атамна-сілавой мікраскопіі. Наібаэь ярькымі дэмастраааьямі вазможнаэсцяў гэтаго экспэрымэнтальнаго направлэнія пры ісслэдаваніі паверхнасцяў твэрьдх тэла могуь служыць рэзуьльтаты па прямоь вэзуалізааія паверхнастнаь рэаэнаструкаія [5],

манипуляция отдельными атомами для записи информации с рекордной плотностью, исследование локального влияния поверхностных дефектов на зонную структуру образца [6] и пр. Атомно-силовой микроскоп может работать практически в любой среде, включая водный раствор, и это открывает новые возможности для изучения биологических и органических материалов [7].

Атомно-силовой микроскоп использует силу существующего взаимодействия между зондом и образцом для построения изображения объекта (рис. 1). На расстоянии около одного ангстрема между атомами образца и атомом зонда (кантилевера) возникают силы отталкивания, а на больших расстояниях — силы притяжения [8]. Когда думаешь о том, как работает АСМ, необходимо пренебречь понятиями об обычной конструкции микроскопа, так как нет линзы, через которую оператор смотрит на образец. Действительно, микроскоп представляет собой *проектор*, проецирующий объекты и явления микромира на доступный нашему восприятию экран — здесь в силу многих причин удобно использовать экран монитора

компьютера. В этом случае проекция становится отчасти осязаемой, поскольку допускает возможность дополнительного анализа с помощью соответствующего программного обеспечения. Однако подобное проецирование несёт только частичную информацию об объекте, к тому же отчасти искажённую влиянием самого проектора. Восстановление по проекции реальных свойств исследуемых объектов является типичной обратной задачей, требующей решения и для зондовой микроскопии.

По способу измерения и фиксации силового взаимодействия зонда и образца выделяется два основных режима работы АСМ: контактная атомно-силовая микроскопия и АСМ прерывистого контакта.

При сканировании АСМ в контактном режиме система *обратной связи* поддерживает на заданном уровне величину изгиба кантилевера (следовательно, и силы воздействия зонда на образец) посредством вариации Z-координаты точки закрепления кантилевера. Сигнал обратной связи несёт, таким образом, информацию о топографии поверхности.

Для измерения и фиксации при сканировании интенсивности силового взаимодействия зонда и образца в АСМ *прерывистого контакта* (бесконтактный режим, *tapping mode*) используется резонансная схема. Дополнительный пьезоэлемент возбуждает вынужденные колебания кантилевера на его резонансной частоте (вдали от поверхности образца). При сближении зонда и образца возникновение дополнительного градиента сил их взаимодействия приводит к сдвигу резонансной частоты и частичному выходу системы из резонанса. Наряду с этим при соударениях зонда и образца увеличивается демпфирование колебаний за счёт неупругих процессов. Следствием обоих механизмов является уменьшение амплитуды колебаний.

При сканировании АСМ в режиме прерывистого контакта система обратной связи поддерживает на заданном уровне именно величину *амплитуды колебаний*. В силу высокой чувствительности амплитуды колебаний к среднему значению расстояния между зондом и образцом можно получать

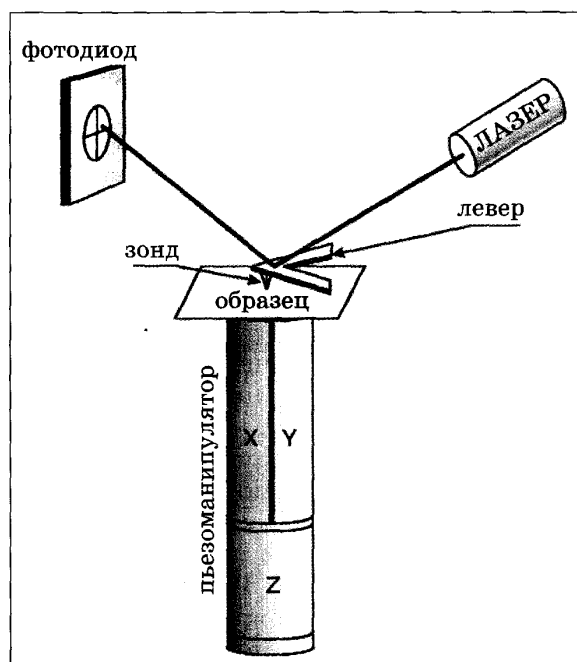


Рисунок 1 — Основные узлы механической части атомно-силового микроскопа

информацию о топографии поверхности с достаточно высоким пространственным разрешением.

Работа АСМ основана на нескольких основных принципах физики, которые делают её подходящей темой для обсуждения в курсе физики средней школы. Это также делает АСМ полезным для моделирования простых экспериментов, дающих школьникам практический опыт и стимул для дальнейшей научной работы.

Предложенная модель АСМ демонстрирует два основных режима, используемых в работе реального микроскопа: контактный и бесконтактный. Модель сочетает в себе темы школьной учебной программы по физике, имеющие важное значение для понимания функционирования АСМ: закон Гука, вынужденные колебания, резонанс и закон отражения.

Важно отметить разницу между представленной моделью и реальным АСМ. В нашем случае магнитное взаимодействие является единственным видом взаимодействия между образцом и микроскопом, в то время как реальный АСМ основан на Ван-дер-Ваальсовом взаимодействии.

Нашей целью в разработке модели было то, чтобы она могла быть в достаточно короткое время построена учителями и их учениками для демонстрации и понимания основ сканирующей зондовой микроскопии.

В **контактном режиме** образец равномерно перемещается построчно под кантилевером, который (согласно закону Гука) изгибается под действием сил, действующих между зондом и образцом. Изгибы кантилевера отражают рельефность поверхности образца.

Модель АСМ, работающего в контактном режиме, представлена на рисунке 2, её основные элементы крепятся на двух штативах. Консоль вырезана из компакт-диска, который сочетает в себе хорошую упругость и отражающую способность. Используем часть диска, которая не имеет печати на верхней поверхности, и зафиксируем её на штативе лицевой стороной вниз (отражение от верхней поверхности компакт-диска

лучше, чем с поверхности данных, которая защищена прозрачным пластиковым слоем). Вместо иглы зонда используем сильный небольшой магнит, размеры которого сопоставимы с размерами исследуемых неровностей, в нашем случае диск диаметром 25 мм и высотой 3 мм, приклеенный к нижней поверхности кантилевера. В качестве источника света используем лазерный диод, закреплённый на втором штативе. Лазер необходимо направить так, чтобы луч падал на отражающую часть кантилевера в свободном его конце.

Далее необходимо сделать образец с подходящим рельефом. Изначально для успешной демонстрации достаточно будет одной линии «атомов». Мы считаем, что на школьном уровне все важные особенности метода сканирования можно показать, наблюдая и изучая сканирование линии. Металлические и пластиковые лабораторные бруски примерно одинакового размера будут составлять ряд неровностей поверхности, которые реагируют или не реагируют на магнитное взаимодействие. Можно использовать полосу из мягкого металла и создать на ней с помощью инструментов определённый «ландшафт». Изготовленный

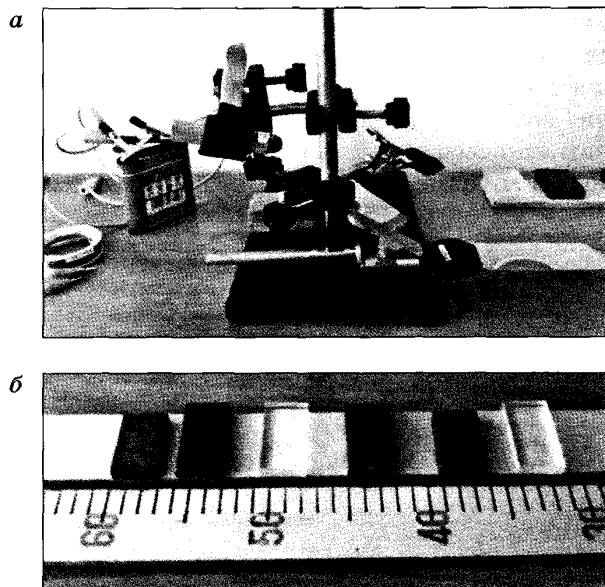


Рисунок 2 — Модель АСМ для работы в контактном режиме (а); образец «атомного ландшафта», изготовленный из брусков (б)

образец с «атомной структурой» показан на рисунке 2.

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на разрешение АСМ, является острота зонда, в нашем случае это размеры магнита. В простейшем приближении можно представить себе его острие как полусферу радиусом R , прокатываемую по исследуемой поверхности (рис. 3) (на практике эффективный радиус несколько больше, чем радиус наконечника). Когда кончик движется по выступу, центр наконечника очерчивает фигуру, которая шире, чем выступ, а когда зонд перемещается над впадиной, она кажется более узкой. Отметим также, что впадины с шириной меньше диаметра наконечника кажутся мельче, чем есть на самом деле. Это искажение иногда называется свёрткой острия.

Готовую модель АСМ помещаем перед экраном на расстоянии около 1—2 метров. Исследуемый образец расположен на столе под магнитом-зондом. На экране отмечается начальное положение лазера по вертикали. Образец медленно и постепенно перемещается перпендикулярно кантилеверу, при этом световое пятно на экране будет двигаться вверх и вниз, а все его отклонения фиксируются. Этот эксперимент легче провести группой из нескольких учащихся. Первый ученик перемещает образец с шагом 5 мм, второй отсчитывает положение светлого пятна на стене, а третий ученик записывает данные. Когда все данные собраны, измеренная форма поверхности

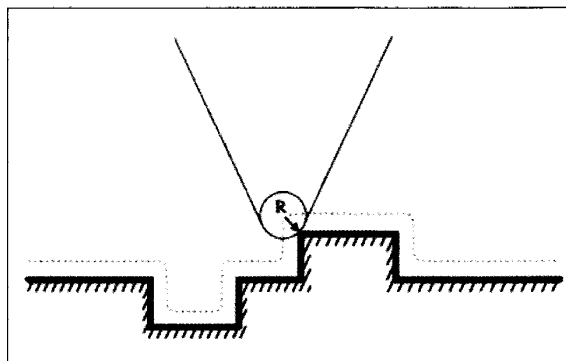


Рисунок 3 — Форма поверхности, описываемая зондом: выступы кажутся шире, а впадины — уже

сравнивается с формой образца. Также можно заранее подготовить листы с фотографией вида образца сбоку и с системой координат, построенной над ним (оставляя произвольную вертикальную шкалу), и все измерения отмечать на них (рис. 4). Позиции светового пятна на стене (вдоль вертикальной оси) измеряются в условных единицах. После этого проводится перенос измеренных точек в систему координат и анализ сходства и различия между оригинальным и измеренным профилем.

Даже такой очень простой модели достаточно, чтобы показать на ней принцип действия, а также некоторые ограничения метода. Хорошо видно, что зазор между вторым и третьим брусками кажется глубже, чем зазор между пятым и шестым. Отметим также, что высота второго и третье-

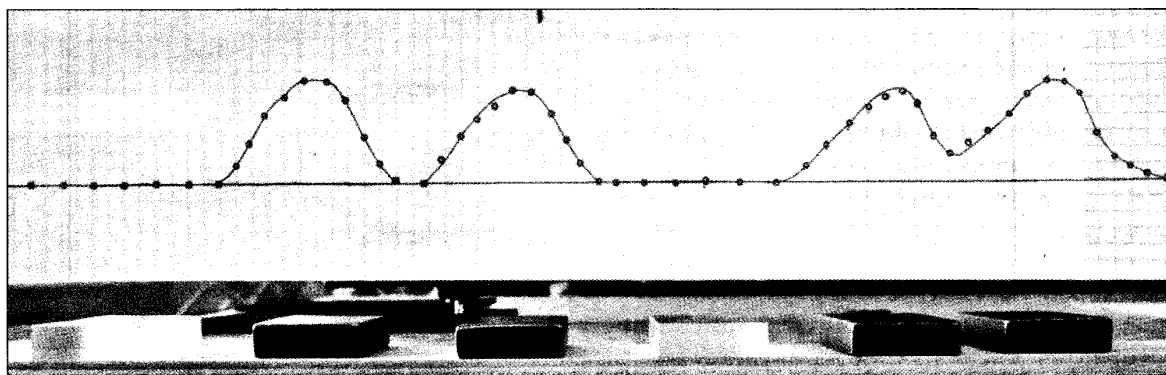


Рисунок 4 — Графическое представление результатов измерений, полученных в контактном режиме, и исходного образца

го брусков кажется больше по сравнению с высотой других брусков. Это, вероятно, из-за небольшого смещения брусков относительно линии сканирования. Бруски 1 и 4 не воспринимаются зондом в данной модели, так как изготовлены из стекла.

Дополнительно можно провести расчёты амплитуды колебания зонда по измеренному движению светового пятна на стене, расстоянию от зонда до стены и от зонда до лазера.

При моделировании бесконтактного режима кантилевер приводится в движение с помощью внешней гармонической силы с частотой, которая подбирается близкой к резонансной частоте собственных свободных колебаний зонда (в нашем случае резонансная частота была 14,6 Гц). Теперь, если образец приблизить к зонду, возникает сила взаимодействия между зондом и образцом, как если бы мы изменили жёсткость кантилевера (пластинки диска). Это, в свою очередь, приводит к изменению резонансной частоты кантилевера и соответственно к уменьшению амплитуды колебаний.

Чтобы собрать нашу модель АСМ для работы в бесконтактном режиме, добавляем небольшую катушку и генератор переменного тока. Катушка содержит 100 витков лакированной медной проволоки толщиной 0,2 мм на пластмассовом кольце диаметром 35 мм. Катушку помещаем в зажиме над зондом с магнитом и приводим кантилевер в резонанс путём регулирования частоты тока в катушке. Такая конструкция позволяет переключаться между контактным и бесконтактным режимами работы. Катушка и собранная модель АСМ для работы в бесконтактном режиме приведены на рисунке 5.

При работе в бесконтактном режиме необходимо сначала отрегулировать частоту и амплитуду тока в катушке и расстояние между моделью АСМ и доской таким образом, чтобы зонд (без образца внизу) находился в резонансе, а пятно отражённого лазерного луча на доске колебалось с заметной амплитудой. Когда это достигнуто, помещаем образец под кантилевер и перемещаем шаг за шагом, как и в предыдущем эксперименте, отмечая положение колеблющегося лазерного пятна на стене. Ам-

плитуда колебаний пятна уменьшается при прохождении под зондом металлического бруска и возвращается к исходному значению при прохождении между брусками и над стеклянными брусками. Процедура измерения проходит быстрее и легче, если выполняется группой учеников.

Когда все данные собраны, изменение амплитуды можно сравнить с формой образца. Опять же это может быть сделано путём построения графика измеренных значений на подготовленных листах с реальным профилем образца в системе координат, построенной над ним. Отметим, что измеренная форма в этом случае будет отображаться в обратном порядке, так как самые крупные выступы в образце будут производить самые малые амплитуды. Нормальная форма может быть получена путём вычитания измеренных значений из наибольшего измеренного значения амплитуды (рис. 6).

Так как в этом эксперименте сила взаимодействия между зондом и образцом имеет тот же характер, что и в контактном режиме, полученная поверхность в бесконтактном режиме имеет форму, аналогичную форме поверхности, полученной в контактном режиме.

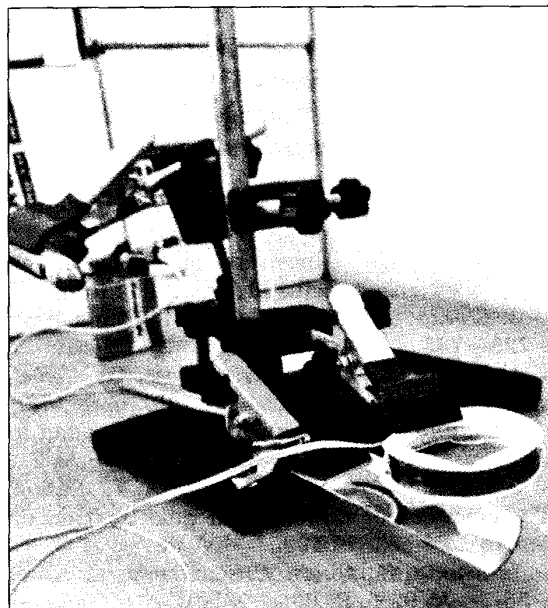


Рисунок 5 — Модель АСМ для работы в бесконтактном режиме

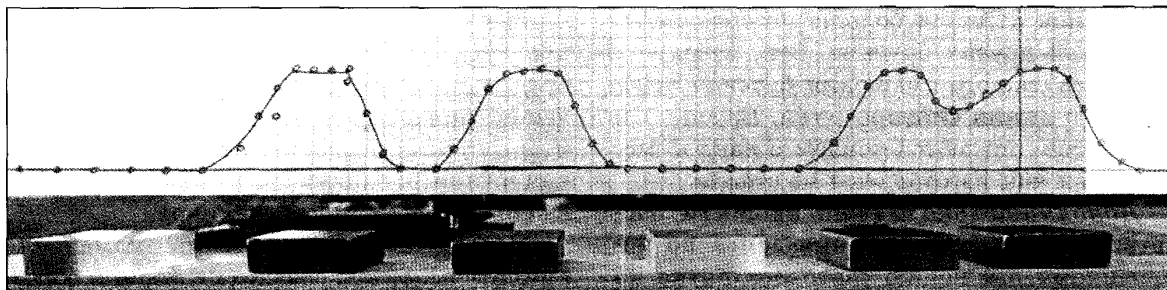


Рисунок 6 — Графическое представление результатов измерений, полученных в бесконтактном режиме, и исходного образца

Заключение

В процессе построения и изучения работы описанной учебной модели атомно-силового микроскопа были организованы факультативные занятия для учеников в рамках школьной исследовательской лаборатории, подготовлена и представлена работа на районную научно-практическую конференцию школьников. Модель может продемонстрировать контактный и бесконтактный режимы работы атомно-силового микроскопа, а также основные принципы работы и недостатки, которые ограничивают разрешение метода. Она удобна и наглядна для проведения факультативных занятий в средней школе, а также может быть использована в качестве демонстрационного или лабораторного эксперимента. Модель даёт возможность учащимся полу-

чить представления о физике инженерных решений, построении наномасштабных моделей, работе с наноматериалами.

В ходе выполнения работ у школьников формируется представление об особенностях атомно-силовой микроскопии, что позволяет не только визуализировать микромир поверхности, но и получать дополнительную информацию о её свойствах. Учащиеся актуализируют знания из различных разделов физики, приобретают опыт принятия инженерных решений при построении лабораторного оборудования, учатся анализировать физические явления. Это позволит им в дальнейшем лучше понимать сущность протекающих процессов и даст направление в работе с более совершенными системами.

Список использованных источников

1. Gyalog, T. 2007 Nanoscience education in Europe // *Europhys. News*, **38** 13, also available online at <http://www.europhysicsnews.org>.
2. Home page of Institute for Physics Teachers, Centre for Nanoscale Systems, Cornell University <http://www.cns.cornell.edu/cipt/index.html>.
3. Binnig, G., Rohrer, H. Scanning tunneling microscopy // *Helv. Phys. Acta.* — 1982. — V. 55. — P. 726—735.
4. Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C., Weibel, E. Tunneling through a controllable vacuum gap // *Appl. Phys. Lett.* — 1982. — V. 40. — P. 178—180.
5. Бинниг, Г. Сканирующая туннельная микроскопия — от рождения к юности / Г. Бинниг, Г. Рорер // *УФН.* — 1988. — Т. 154. — № 2. — С. 261—277.
6. Maslova, N. S., Oreshkin, A. I., Panov, V. I., Savinov, S. V., Kalachev, A. A., Rabe, J. P. STM evidence of dimensional quantization on the nanometer size surface defects // *Solid State Communications.* — 1995. — V. 95. — № 8. — P. 507—510.
7. Binnig, G., Quate, C. F., Gerber, C. Atomic force microscopy // *Phys. Rev. Lett.* — 1986. — V. 56. — № 9. — P. 930—933.
8. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учеб. пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений / В. Л. Миронов; РАН; Институт физики микроструктур. — Нижний Новгород, 2004. — 114 с.